DOI: 10.5846/stxb201510152081
王霖娇, 李瑞, 盛茂银.典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性.生态学报,2017,37(5):1367-1378.
Wang L J, Li R, Sheng M Y.Distribution of soil organic carbon related to environmental factors in typical rocky desertification ecosystems.Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1367-1378.

典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性

王霖娇[1,2], 李　瑞[3], 盛茂银[1,2,4,*]
1 贵州师范大学喀斯特研究院,贵阳　550001
2 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵阳　550001
3 贵州省水土保持监测站,贵阳　550002
4 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地,贵阳　550001

摘要:选取中国西南 3 个典型喀斯特石漠化生态系统(贵州毕节鸭池高原山地石漠化区、贵阳红枫湖高原盆地石漠化区和关岭花江高原峡谷石漠化区)为研究区,广泛建立野外样地,开展石漠化生态系统土壤有机碳分布及其与石漠化等级、地形地貌、植被、土壤性质等环境因子的相关性研究。结果表明:1)喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳含量较低,毕节鸭池、贵阳红枫湖和关岭花江 3 个石漠化生态系统平均值分别为 23.42、25.78、26.03 g/kg,且 3 个不同地貌类型石漠化土壤有机碳含量无明显差异。2)土地覆被变化明显影响了土壤有机碳含量,原生森林土壤有机碳平均含量 31.32 g/kg,是所有类型中最高的。随着土地覆被由原生森林至石旮旯地退化不断增加的过程,土壤有机碳含量显示先降低后增加的变化趋势。3)土壤有机碳与土壤特性有明显的相关性,与土壤总氮、水解氮、速效钾、总孔隙度、自然含水量、毛管持水量、田间持水量和上层渗透性存在极显著地正相关,与总磷、下层渗透性存在显著地正相关,与容重存在极显著地负相关。4)植物多样性的丰富度指数(R)和多样性指数(H)与土壤有机碳含量有明显的相关性,达到了极显著的水平。5)不同石漠化等级土壤有机碳含量有显著差异,随着石漠化干扰程度的递增,土壤有机碳含量显示了先减小后增加的趋势。研究结果对中国西南喀斯特森林生态保护、石漠化生态系统恢复重建以及应对全球气候变化碳循环的减源增汇具有重要的理论意义和实践指导价值。

关键词:喀斯特;石漠化;土壤有机碳;分布格局;影响因子

Distribution of soil organic carbon related to environmental factors in typical rocky desertification ecosystems

WANG Linjiao[1,2], LI Rui[3], SHENG Maoyin[1,2,4,*]
1 *Karst Research Institute, Guizhou Normal University, Guiyang* 550001, *China*
2 *National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guiyang*, 550001, *China*
3 *Guizhou Provincial Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang* 550002, *China*
4 *State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang* 550001, *China*

Abstract: Karst rocky desertification is an important ecological issue hindering the socioeconomic development of the South China Karst region. In the present study, firstly, three typical rocky desertification regions—Bijie Yachi, Qingzhen Hongfenghu, and Guanling Huajiang, Guizhou Province, representing three different typical karst landforms—plateau mountain, plateau basin, and plateau gorge, respectively, were selected as experimental areas. Then, 90 sample plots with

基金项目:贵州省社会发展攻关计划课题(黔科合 SZ 字〔2014〕3036 号);国家水利部公益性行业科研专项经费项目(201401050);贵州省水利科技经费项目(KT201409);贵州师范大学博士科研启动基金(202)
收稿日期:2015-10-15;　　**网络出版日期**:2016-07-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shmoy@163.com

an area of 20 m × 20 m each were established. The distribution of soil organic carbon (SOC) in relation to environmental factors (degree of rocky desertification, landform, vegetation, soil property, etc.) in these plots was determined using field measurements, laboratory detection, and mathematical statistics. The following results were obtained: 1) The SOC content of karst rocky desertification ecosystems was low. The average content of the three experimental areas of Bijie Yachi (Plateau Mountain), Qingzhen Hongfenghu (Plateau Basin), and Guanling Huajiang (Plateau Gorge) was 23.42, 25.78, 26.03 g/kg, respectively. There was no significant ($P=0.23$) difference of SOC contents among the three different landform experimental areas. 2) Land cover change can affect the SOC content. The SOC content of virgin forest (31.32 g/kg) was the highest. With increased soil degeneration from virgin forest to gravel land, the SOC content first decreased and then increased. 3) The SOC content was correlated with soil physico-chemical properties. Specifically, the SOC content was extremely significantly positively correlated with total nitrogen content, hydrolyzed nitrogen content, available potassium content, total porosity, total phosphorus content, natural moisture capacity, field moisture capacity, capillary moisture capacity, and upper strata saturated permeability; significantly positively correlated with total phosphorus content and lower strata saturated permeability, and extremely significantly negatively correlated with soil bulk density. 4) The SOC content and plant diversity rich (R) and diversity (H) indices were extremely positively correlated. 5) There were significant differences of SOC contents between different degrees of rocky desertification. Along with increased degrees of rocky desertification, the SOC content initially decreased and then increased. Based on these results, the distribution pattern of the SOC content and its impact factors in karst rocky desertification ecosystems was clarified. These results have important implications for the protection of karst forest ecosystems, the reconstruction of rocky desertification ecosystems, and the response to global climate change.

Key Words: karst; rocky desertification; soil organic carbon; distribution pattern; impact factors

随着全球气候变化越来越受到世界各国的关注,土壤有机碳的研究日益成为全球碳循环研究的热点[1]。土壤碳库是陆地生态系统碳库中最大的碳库,土壤在全球碳平衡中的作用和土壤碳固定增汇能力受到了广泛的关注[2-3]。土壤有机碳与养分供给、防止土壤侵蚀有重要关系。土壤有机碳储量的减少将直接导致土壤质量降低,表现为土壤供给作物养分的能力、土壤的耕性、通气性和透水性迅速降低[4]。喀斯特石漠化是在喀斯特地区脆弱生态环境下,人类不合理的社会经济活动造成人地矛盾突出、植被破坏、水土流失、岩石逐渐裸露、土地生产力衰退甚至丧失,地表呈现石质荒漠景观的演变过程或结果[5-6]。石漠化演替过程一般可以划分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化等几个典型演化阶段。喀斯特石漠化已成为制约中国西南地区可持续发展最严重的生态地质环境问题[7-10]。喀斯特石漠化其本质是土壤质量发生了改变,主要表现在土壤的物理性质、化学性质和生物性质的变化[10-11]。国内外专家就喀斯特石漠化引发的土壤生态系统退化研究主要集中在土壤石漠化成因、土壤退化特征、退化生态系统的植被恢复等方面,对于不同等级石漠化和石漠化背景下土壤中碳循环及土壤有机碳的分布情况研究极少[12-14]。

喀斯特生态系统中碳的输入途径主要有大气降水对 CO_2的沉降,植物的生长对大气 CO_2的吸收和岩溶作用对岩石的溶解,而碳的输出途径主要有土壤表面 CO_2的排放进入大气圈和岩溶水中 HCO_3^- 的输出[15-16]。系统中碳的分布与转移及循环以生态系统过程和生物作用影响下的植物碳吸收和土壤碳释放为主导,以生物活动为纽带的土壤碳转化为中心,土壤有机碳积累构成喀斯特系统中最大的碳库,土壤呼吸排碳表现为系统中最大的碳流通途径[17]。喀斯特系统中碳的转移过程受到土壤碳的支配和控制,土壤碳成为驱动和制约表层喀斯特系统碳转移的动力机制[17]。这些过程因土壤发生特点、土壤环境条件的变化以及土地利用而处于动态变化之中,因此,研究典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳分布格局及其影响因素,对喀斯特动力学系统的驱动作用具有重要的意义。本研究通过对中国西南喀斯特典型石漠化生态系统(贵州鸭池高原山地石漠化区、贵阳红枫湖高原盆地石漠化区、关岭花江高原峡谷石漠化区)土壤有机碳分布及其与石漠化等级、地形

地貌、植被、土壤性质等环境因子的相关性研究,阐明喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳的时空分布格局及其环境影响因素,探索喀斯特石漠化生态系统退化与修复演变过程中,土壤有机碳的响应规律及其内在机制,为石漠化生态系统重建以及应对全球气候变化碳循环减源增汇提供参考。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

选择了中国西南喀斯特山地典型石漠化区贵州毕节鸭池(研究区Ⅰ)、贵阳红枫湖(研究区Ⅱ)、关岭花江(研究区Ⅲ)为研究区,分别代表了喀斯特高原山地、高原盆地和高原峡谷 3 个典型地貌石漠化,具体地理位置和基本信息见表 1 和图 1。

表 1　研究区基础信息及样方设置

Table 1　Basic information of experiment sites and sample plots set in the present study

研究区 Experiment site	位置 Location	中心点坐标 Latitude and longitude of centre	海拔/m Altitude	地貌 Landform	土壤类型 Soil type	石漠化等级 Degree of rocky desertification	岩石裸露率/% Percentage of exposed rock	样方数(编号) Sum (serial number) of sample plot
Ⅰ	贵州毕节市鸭池	27°15.08′ N 105°21.263′ E	1400—1742	喀斯特高原山地	黄壤、黄色石灰土	强度	30—35	6(Ⅰ1—6)
						中度	20—29	6(Ⅰ7—12)
						轻度	0—5	6(Ⅰ13—18)
						潜在	0—5	6(Ⅰ19—24)
						无	0	6(Ⅰ25—30)
Ⅱ	贵州清镇市红枫湖	26°30.961′ N 106°20.328′ E	1271—1451	喀斯特高原盆地	黄壤、黄色石灰土	强度	30—35	6(Ⅱ1—6)
						中度	20—29	6(Ⅱ7—12)
						轻度	0—5	6(Ⅱ13—18)
						潜在	0—5	6(Ⅱ19—24)
						无	0	6(Ⅱ25—30)
Ⅲ	贵州安顺市花江	25°39.40′ N 105°39.042′ E	450—1450	喀斯特高原峡谷	黄壤、黄色石灰土	强度	30—35	6(Ⅲ1—6)
						中度	20—29	6(Ⅲ7—12)
						轻度	0—5	6(Ⅲ13—18)
						潜在	0—5	6(Ⅲ19—24)
						无	0	6(Ⅲ25—30)

研究区Ⅰ　位于贵州省毕节市鸭池镇东南 13 km 处,属长江流域乌江水系白浦河支流区。区内以喀斯特高原山地地貌类型为主,地势起伏大,海拔为 1400—1742 m。区内年均降雨量为 863 mm,降雨量主要分布在 7—9 月,占全年总降雨的 52%。岩石以碳酸盐类的石灰岩为主,有部分侏罗纪紫色砂页岩、页岩分布,土壤以黄壤土及紫砂土为主。植被为亚热带常绿落叶针阔混交林,原生植被基本上被破坏,现以次生植被为主。野生植被有以窄叶火棘(*Pyracantha angustifolia*)、刺梨(*Rosa roxbunghii*)、救军粮(*Pyracantha fortuneana*)、铁线莲(*Clematis florida*)等为主的藤、刺、灌丛,以及零星分布的青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、光皮桦(*Betula luminifera*)为主的乔木林。

研究区Ⅱ　位于贵州省清镇市红枫镇簸箩村王家寨组,距清镇市 12 km,属长江流域乌江水系麦翁河支流区。区内地貌类型为典型的喀斯特高原盆地,地势平缓,海拔为 1271—1451 m。区内年均降雨量为 1215 mm,降雨量主要分布在 4—8 月,占全年总降雨的 75%。区内岩石以石灰岩为主,有部分三叠系的白云岩、泥质白云岩及页岩,土壤以黄壤、黄色石灰土为主。植被以农田植被为主,自然植被在小区中所占比重较小,其中柏木(*Cupressus funebris*)是其常见乔木物种,灌木层多为典型石灰岩有刺灌丛,以金佛山荚蒾(*Viburnum chinshanense*)、救军粮、野蔷薇(*Rosa multiflora*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*)、亮叶鼠李(*Rhamnus hemsleyana*)等为主,草本层常见种类有白茅(*Imperata cylindrica*)、五节芒(*Miscanthus floridulu*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)、铁线莲等。

研究区Ⅲ　位于贵州省安顺市北盘江花江河段峡谷两岸,地貌类型为典型的喀斯特高原峡谷,地势起伏

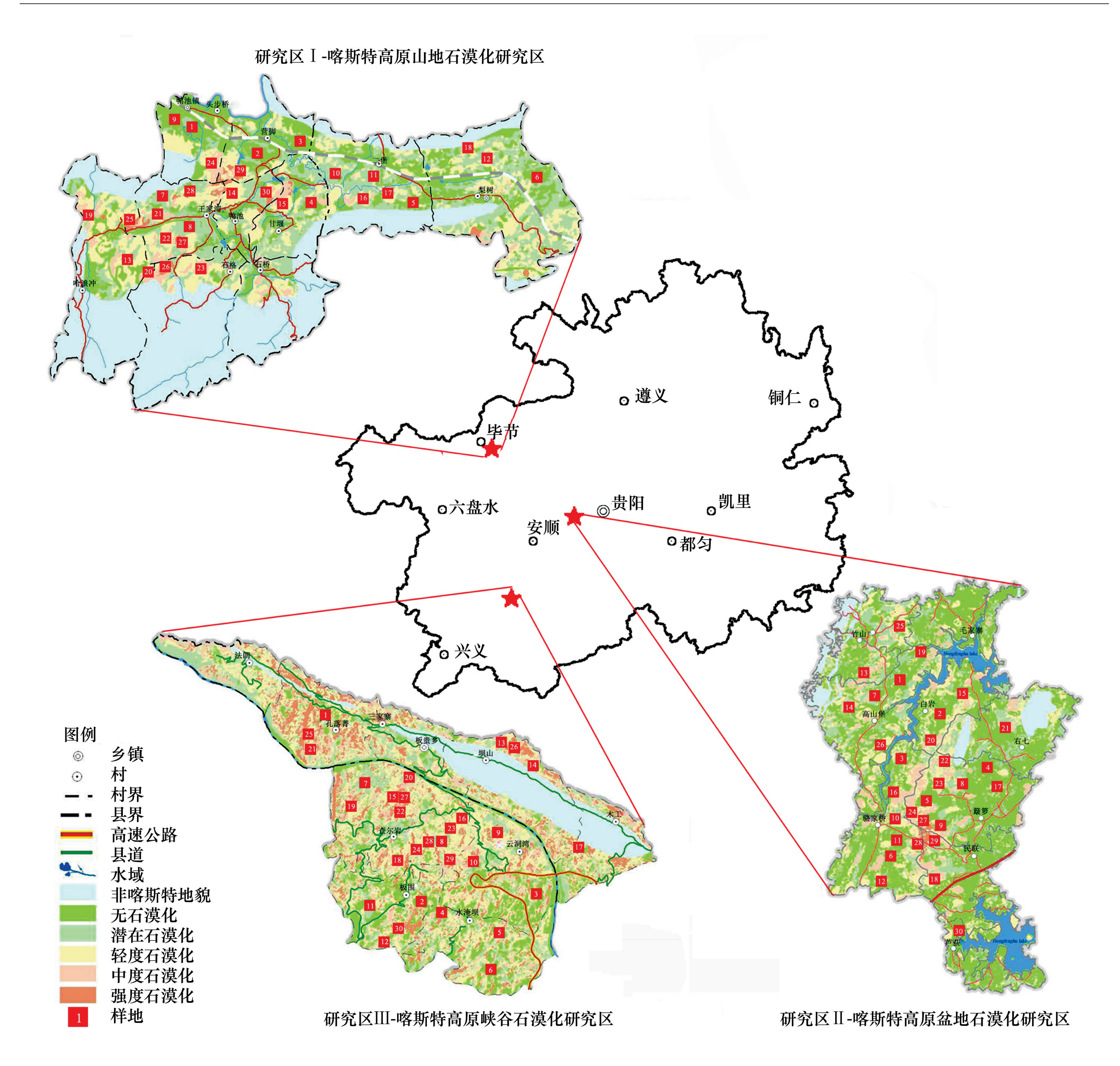


图 1　研究区位置及其概况

Fig.1　Location and basic information of experiment sites in the present study

大,海拔为 450—1450 m,相对高差达 1000 m。区内年均降雨量为 1100 mm,降雨量主要分布在 5—10 月,占全年总降雨的 83%。区内岩石以石灰岩为主,有部分三叠系的白云岩、泥质白云岩及页岩。土壤以黄壤、黄色石灰土为主。植被为亚热带常绿落叶针阔混交林,原生植被基本上被破坏,现以次生植被为主。野生植被是以窄叶火棘、刺梨、救军粮、铁线莲等为主的藤、刺、灌丛,以及零星分布的青冈、马尾松、光皮桦为主的乔木林。

1.2　研究方法

1.2.1　石漠化等级确定与样地建立

在对研究区详细踏查的基础上,基于喀斯特生态系统退化梯度,将石漠化演替划分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化与强度石漠化等 5 个等级,具体划分标准参照熊康宁等[18]的划分方法,略有改动,具体见表 2。基于上述石漠化等级,选取研究区 5 个石漠化演替典型阶段为研究对象,分别为无石漠化的原生森林、潜在石漠化的疏林地、轻度石漠化的灌草地、中度石漠化的疏草地和强度石漠化的石旮旯地。在每个研究区分别针对每个研究对象设立面积为 20 m × 20 m 重复样地 6 个,共建立了 90 个土壤取样样地

(表 1)。所有的样地土壤是同质的、均为黄色石灰土,海拔、地貌、岩石裸露率等具体参见表 1。

表 2　岩溶地区石漠化分级遥感调查标准表[18]

Table 2　Classification standard of karst rocky desertification

石漠化等级 Degree of rocky desertification	0.2km^2 的图斑中岩石裸露率 Percentage of exposed rock in a area of 0.2 km^2/%	0.2km^2 的图斑中植被+土被覆盖率 Percentage of soil or vegetation in a area of 0.2 km^2/%	参考指标 Reference index
无 Nil	<20	>80	坡度≤15°的非梯土化旱坡地、田间坝子、建筑用地等,生态环境良好,林灌草植被浓密,无水土流失或水土流失不明显;宜农、林、牧地
潜在 Potential	20—30	80—70	坡度>15°的非梯土化旱坡地、草地等,林灌草植被稀疏,成土条件好但水土流失明显;有岩石裸露的趋势
轻度 Slight	31—50	69—50	岩石开始裸露,土壤侵蚀明显,植被结构低、以稀疏的灌草丛为主,或人工旱地植被
中度 Moderate	51—70	49—30	石质荒漠化加剧,土壤侵蚀严重,土层浅薄,多为石质坡耕地和稀疏灌丛草坡
强度 Severe	>70	<130	石质荒漠化强烈,基本无土可流,多为即将丧失农用价值的难利用地

1.2.2　土壤取样与土壤有机碳测定

在样地中心按蛇形方式选 3 个采样点,各点间距在 5 m 之内。2014 年 4 月和 8 月分别在各样点用环刀(0—15 cm)取样 3 次重复,均匀混合组成待测土样。石漠化区域土壤很薄,部分仅有 15 cm 左右,因此以 0—15 cm 土壤层中作为研究对象。土壤总有机碳用重铬酸钾外加热法测定,具体方法参见鲍士旦[19]。

1.2.3　土壤理化因子测定

容重、田间持水量、自然含水量和毛管持水量测定采用环刀法;总孔隙度用 $p_t = 93.947 - 32.995 \times b$ 来计算,式中 b 为容重,p_t为总孔隙度;毛管孔隙度测定采用环刀法;非毛管孔隙度用 $p_o = p_t - p_c$来计算,式中 p_o为非毛管孔隙度,p_c为毛管孔隙度;渗透特性测定采用双环渗透法。pH 值采用 2.5∶1 的水土比,用电位计法测定;全氮采用硫酸钾为硫酸铜为硒粉消煮,定氮仪自动分析法测定;水解氮采用碱解扩散法测定;全磷采用硫酸为高氯酸消煮为钼锑抗比色法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提为钼锑抗比色法测定;全钾采用氢氟酸为高氯酸消煮火焰光度计法测定;速效钾采用中性乙酸铵提取为火焰光度计法测定;土壤呼吸采用气室法进行测定。以上分析方法见森林土壤分析方法[19]。

1.2.4　植物多样性分析

丰富度 $R = S$,多样性 Shannon-Wiener 指数 $H = -\sum_{i=1}^{S} P_i \log P_i$,均匀度 $E = H/\ln S$,Simpson 优势度指数 $D = \sum_{i=1}^{S} P_i{}^2$,式中 S 为物种数目,P_i为种 i 的相对重要值,即 $P_i = N_i/N$,N_i为第 i 个物种的重要值,N 为所有重要值之和,重要值=RDE+RDO+RFE,式中 RDE 为相对密度,RDO 为相对优势度(胸高断面积),RFE 为相对频度。上述研究方法参加森林生态系统定位研究方法[20]。

1.2.5　数据处理

采用 Excel 软件进行绘图,利用 SPSS 16.0 软件进行方差分析、t 检验、多重比较(Duncan 检验)、相关性分析和主成分分析等统计分析[21]。

2　结果与分析

2.1　喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳的空间分布格局

2.1.1　喀斯特地貌特征与土壤有机碳分布的关系

(1) 研究区喀斯特地貌特征

地形因素影响土壤中水分的渗入蒸发及土壤生态系统的物质循环过程,进而对土壤有机碳库产生影响[22]。土壤性质也对土壤有机碳库有一定的影响。因此,本研究选择了代表西南喀斯特典型地形地貌的3个研究区开展喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳的分布研究。所选择的3个研究区分别代表了西南喀斯特高原山地、高原盆地和高原峡谷3个典型地貌类型,具体自然地理特征见表1和3。

表3 3个研究区喀斯特地貌的典型特征

Table 3 Karst landform characteristics of three experimental sites studied

特征参数 Parameter of landform	研究区Ⅰ Experiment site Ⅰ	研究区Ⅱ Experiment site Ⅱ	研究区Ⅲ Experiment site Ⅲ
地质基础 Geological base	海拔1310—1770m,地处滇东高原向黔中山地过渡的斜坡地带,地质控制强烈,出露地层为二叠系、三叠系茅口组,以碳酸盐类的石灰岩为主	海拔1210—1450m,地质构造类型属于黔中地台凸起与黔南凹陷相汇的过渡地带,主要出露三叠系的狮子山组和茅草铺组的灰岩和白云岩	海拔450—1410m,地质构造总体上属盘江向斜,出露地层为中、上三叠统。碳酸盐岩广布、构造单一,地貌发育受构造的控制很明显
气象气候 Weather and climate	北亚热带湿润季风气候,温凉湿润;年均温14.03℃,≥10℃的积温4116℃,全年日照1377.7h,无霜期255d;年降水量863mm	亚热带高原季风湿润气候,光热条件好,年均温10.8—18.6℃,≥10℃的积温4500℃;年日照时数1277.3h,无霜期278d,年降水量1200mm	海拔850m以下为南亚热带干热河谷气候,以上为中亚热带河谷气候。年均温18.4℃,≥10℃积温6542℃,年均降水量1100mm
河流水系 River system	属长江流域乌江水系白浦河支流区,境内无大的河流水系	中部有麦翁河,东部、南部有红枫湖相连,位于红枫湖水系的上游	北盘江水系,属珠江上游。河谷深切,流域面积小
土壤 Soil	土壤类型多样,黄壤是主要土壤类型。水土流失面积占总面积的69.75%	以黄壤、石灰土、水稻土为主。水土流失面积占总面积的64.30%	以石灰土为主,土壤生产力低。水土流失面积达总面积的49.60%
植被 Vegetation	亚热带常绿阔叶林和针阔混交林,原生植被多被破坏,现残存少量乔木和灌木、草本、藤本等	北亚热带常绿阔叶林类型。原生植被已被大量破坏,仅局部地方有极小面积残存	中亚热带常绿阔叶林类型。原森林植被已被大量破坏,现残存少量乔木和灌木、草本、藤本等

(2)不同喀斯特地貌土壤有机碳含量的分布

3个研究区代表了3个西南喀斯特典型地貌石漠化区域。本研究从研究区尺度研究了不同喀斯特地貌石漠化土壤有机碳含量的分布,具体结果见表4。从表4可以看出,3个喀斯特地貌类型90个取样点春夏两个季节共180个土壤样品土壤有机碳含量的平均值为25.08 g/kg,最小值为13.55 g/kg,最大值为34.82 g/kg。其中,喀斯特高原山地石漠化土壤有机碳平均值为23.42 g/kg,最小值为17.02 g/kg,最大值为33.21 g/kg;喀斯特高原盆地平均值为25.78 g/kg,最小值为16.17 g/kg,最大值为34.82 g/kg;喀斯特高原峡谷平均值为26.03 g/kg,最小值为13.55 g/kg,最大值为33.18 g/kg。多重比较Duncan检验结果显示,不同喀斯特地貌类型石漠化土壤有机碳含量无显著差异,显示喀斯特地貌对土壤有机碳含量无明显影响。

表4 不同喀斯特地貌类型土壤有机碳含量

Table 4 Comparisons of SOC content between the three types of karst landform studied

地貌类型 Landform type	样品数 No.	土壤有机碳含量 SOC Content /(g/kg) 含量变异范围 Range	均值 Mean	$SSR_{0.05}$ *
喀斯特高原山地(研究区Ⅰ) Karst plateau mountain (Experiment site Ⅰ)	12	17.02—33.21	23.42	a
喀斯特高原盆地(研究区Ⅱ) Karst plateau basin (Experiment site Ⅱ)	12	16.17—34.82	25.78	a
喀斯特高原峡谷(研究区ⅢⅠ) Karst plateau gorge (Experiment site Ⅲ)	12	13.55—33.18	26.03	a
合计	180	13.55—34.82	25.08	

* 具有相同字母表示无显著差异,无相同字母表示具有显著差异,小写字母表示α=0.05水平上的差异性,大写字母表示α=0.01水平上的差异性

2.1.2 喀斯特植被特征与土壤有机碳分布的关系

(1)不同土地覆被的土壤有机碳含量分布

针对喀斯特石漠化生态系统 5 个典型土地覆被(原生森林、疏林地、灌草地、疏草地和石旮旯地),在 3 个研究区每种土地覆被分别选择自然地理背景基本一致的 5 个样地共计 30 个检测值进行土壤有机碳含量统计分析,结果见表 5。从表 5 可以看出,土地覆被变化明显影响了土壤有机碳含量,原生森林土壤有机碳平均含量 31.32 g/kg,是所有类型中最高的,疏林地土壤有机碳平均含量为 20.92 g/kg,是所有类型中最低的。灌草地、疏草地、石旮旯地土壤有机碳分别为 28.19、27.59 g/kg 和 26.98 g/kg。多重比较结果显示,原生森林土壤有机碳含量明显大于疏林地土壤有机碳含量,但与灌草地、疏草地、石旮旯地土壤有机碳无明显差异,同样,疏林地土壤有机碳与灌草地、疏草地、石旮旯地土壤有机碳也无明显差异。随着土地覆被由原生森林至石旮旯地退化不断增加的过程,土壤有机碳有先降低后增加的变化趋势。

表 5　不同土地覆被对土壤有机碳含量的影响

Table 5　Effect of land cover to soil organic carbon content

土地覆被 Land cover	样品数 No.	土壤有机碳含量 SOC Conten /(g/kg)		$SSR_{0.05}$ *
		含量变异范围 Range	均值 Mean	
原生森林 Virgin forest	30	19.53—36.34	31.32±1.23	a
疏林地 Open forest land	30	15.54—28.78	20.92±1.54	b
灌草地 Shrub grassland	30	18.33—33.67	28.19±1.32	ab
疏草地 Sparse grassland	30	17.78—35.78	27.59±1.79	ab
石旮旯地 Gravel land	30	16.67—32.89	26.98±1.66	ab

(2)喀斯特石漠化生态系统植物多样性特征与土壤有机碳的相关性

土地覆被变化明显的影响了喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳含量。本研究继续考察了全部 90 个样地 2014 年 4 月和 8 月两个季节共计 180 个检测值 4 种植物多样性指数(丰富度指数 R、多样性指数 H、均匀度指数 E 和优势度指数 D)与土壤有机碳的相关性(表 6)。结果显示,丰富度指数(R)和多样性指数(H)与土壤有机碳含量有明显的相关性,达到了极显著的水平;而植物多样性的均匀度指数(E)和优势度指数(D)与土壤有机碳含量无明显相关性。可见植物的丰富度和多样性可以极显著的影响土壤有机碳的含量。

表 6　喀斯特石漠化生态系统植物多样性对土壤有机碳含量的相关性分析

Table 6　Correlation of SOC content and plant diversity in karst rocky desertification ecosystem

植物多样性 Index of plant diversity	样品数 No.	均值 Mean	标准误 Standard error	与土壤有机碳的相关系数* r value vs SOC content
丰富度指数 Richness index (R)	180	9.4500	0.9459	0.635**
多样性指数 Shannon-Wiener index (H)	180	2.3527	0.1573	0.349**
均匀度指数 Evenness index (E)	180	1.2325	0.1669	0.143
优势度指数 Dominance index (D)	180	0.3445	0.0470	−0.092

** 表示在 $\alpha=0.01$ 水平上的差异性

2.1.3　喀斯特土壤特征与土壤有机碳分布的关系

(1)喀斯特石漠化生态系统的土壤特征

为了进一步了解石漠化土壤特性,研究选择 18 个指标研究了石漠化土壤容重、孔隙度、自然含水量与持水状况、pH 值与土壤呼吸、以及氮、磷、钾含量等特性,具体研究结果见表 7。研究显示,土壤容重在 5 个不同等级石漠化(无、潜在、轻度、中度和强度)环境平均值分别为 1.16、1.28、1.18、1.15、1.13 g/cm^3。石漠化环境土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度平均值分别为 37.56%、18.10%和 55.76%,非毛管孔隙度在不同等级石漠化环境(平均值为 16.40%—18.92%)差异不明显。石漠化环境土壤自然含水量、田间含水量和毛管持水量均值分别为 26.06%、31.09%和 39.03%,其中在不同等级石漠化环境中,土壤自然含水量(平均值为 23.90%—28.57%)差异不明显。石漠化环境土壤上层饱和渗透率和下层渗透率均值分别为 11.26、

7.03 mm/min,且在不同等级石漠化环境中差异均不明显。

无石漠化和强度石漠化环境土壤为酸性,pH 值均小于 7,平均值分别为 6.18 和 6.96,潜在、轻度和中度石漠化土壤 pH 值均大于 7,平均值分别为 7.19、7.49 和 7.46。石漠化环境土壤呼吸均值为 0.13 mg g^{-1} h^{-1}(以 CO_2计),且不同等级石漠化环境无较大差异。石漠化环境土壤总氮和水解氮含量均值分别为 2.63 g/kg 和 175.36 mg/g,不同等级石漠化环境土壤总氮含量差异不大,而水解氮含量存在明显差异。石漠化环境土壤总磷和有效磷含量均值分别为 0.73 g/kg 和 4.63 mg/g,不同等级石漠化环境土壤全磷含量无明显差异,而土壤有效磷存在显著变化。石漠化环境土壤总钾和速效钾含量均值分别为 1.96 g/kg 和 99.02 mg/g,不同等级石漠化环境土壤全钾存在显著差异,而土壤有效钾含量无明显差异。研究结果也显示,随石漠化程度增加,喀斯特石漠化土壤理化特性有先退化后恢复的变化趋势。

表 7 石漠化生态系统土壤理化性质

Table 7 Soil physical-chemical properties of kasrt rocky desertification (KRD) ecosystem

土壤理化性质 Soil physical-chemical properties	平均值±标准误 Average±standard error					均值 Average
	无石漠化 Nil degree of KRD	潜在石漠化 Potential degree of KRD	轻度石漠化 Slight degree of KRD	中度石漠化 Moderate degree of KRD	强度石漠化 Severe degree of KRD	
容重 Bulk density /(g/cm^3)	1.16±0.11ab	1.28±0.12a	1.18±0.12ab	1.15±0.13b	1.13±0.10b	1.18
总孔隙度 Total porosity/%	56.81±2.11ab	52.56±1.71a	55.18±2.01ab	57.48±1.31b	56.78±1.21ab	55.76
毛管孔隙度 Capillary porosity /%	38.13±0.78ab	33.71±0.91a	36.35±1.11ab	38.96±0.88ab	40.63±1.12b	37.56
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity /%	18.67±0.31a	18.92±0.24a	18.84±0.67a	17.69±0.54a	16.40±0.51a	18.10
自然含水量 Natural moisture capacity /%	28.57±1.11a	23.90±0.61a	24.55±0.87a	27.25±1.08a	26.04±0.71a	26.06
田间含水量 Field moisture capacity /%	33.17±1.13ab	28.12±0.91a	29.10±0.78ab	30.65±1.32ab	34.42±1.25b	31.09
毛管持水量 Capillary moisture capacity /%	38.94±1.31ab	35.09±1.52a	36.96±1.41a	39.09±1.76ab	45.06±2.01b	39.03
上层饱和渗漏率 Upper strata saturated permeability /(mm/min)	11.00±1.81a	8.91±0.79a	8.36±1.23a	15.67±1.31a	12.34±0.91a	11.26
下层饱和渗漏率 Lower strata saturated permeability /(mm/min)	3.74±0.41a	6.96±0.78a	10.33±1.23a	8.80±0.71a	5.33±0.86a	7.03
pH	6.18±0.15a	7.19±0.23b	7.49±0.27b	7.46±0.18b	6.96±0.16b	7.06
总氮 Total nitrogen content /(g/kg)	2.90±0.35a	2.10±0.24a	2.88±0.21a	2.65±0.56a	2.60±0.34a	2.63
总磷 Total phosphorus content /(g/kg)	0.64±0.02a	0.76±0.04a	0.82±0.02a	0.74±0.03a	0.71±0.03a	0.73
总钾 Total potassium content /(g/kg)	3.07±0.45a	2.11±0.46b	1.65±0.57b	1.47±0.49b	1.48±0.23b	1.96
水解氮 Hydrolyzed nitrogen content /(mg/g)	201.15±10.09ac	122.91±8.90b	191.33±8.29ab	222.95±9.46c	138.46±11.12ab	175.36
有效磷 Available phosphorus content /(mg/kg)	3.35±0.23a	6.76±0.21b	5.69±0.34ab	3.94±0.55ab	3.43±0.34a	4.63
速效钾 Available potassium content /(mg/kg)	110.13±9.01a	106.12±7.98a	92.03±10.01a	96.03±6.98a	90.81±9.07a	99.02
土壤呼吸 Soil respiration /(mg g^{-1} h^{-1})	0.31±0.03a	0.12±0.02b	0.13±0.01b	0.06±0.01b	0.05±0.01b	0.13

(2)土壤理化性质与土壤有机碳的相关性

土壤有机碳是土壤固相部分的重要组分,它与土壤矿物质共同作为林木营养的来源[23-25],土壤的一系列物理、化学和生物学性质对土壤有机碳具有直接和间接的影响。本研究统计分析了 17 个土壤理化因子与土壤有机碳的相关性,结果见表 8。从表 8 可以看出,土壤有机碳与土壤其它绝大多数理化因子具有明显的相关性,与土壤总氮、水解氮、速效钾、总孔隙度、自然含水量、毛管持水量、田间持水量和上层渗透性存在极显著地正相关,与总磷、下层渗透性存在显著地正相关,与容重存在极显著地负相关,而与 pH、总钾、有效磷、土壤呼吸、毛管孔隙度、非毛管孔隙度无明显相关性。可见,石漠化环境有机碳是土壤理化性质的关键因子,在改善土壤理化性质和促进养分循环方面起着关键作用。

表 8　喀斯特石漠化生态系统土壤理化性质对土壤有机碳的相关性分析

Table 8　Correlation of SOC and other soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem

土壤理化性质 Soil physical-chemical properties	样品数 No.	含量变异范围 Content range	均值 Mean	与土壤有机碳的相关系数 r value vs SOC content
pH	180	6.18—7.49	7.06	0.096
总氮 Total nitrogen content /(mg/kg)	180	2104.47—2901.52	2629.08	0.834**
总磷 Total phosphorus content /(mg/kg)	180	636.08—820.07	732.69	0.270*
总钾 Total potassium content /(mg/kg)	180	1466.05—3066.12	1953.05	0.051
水解氮 Hydrolyzed nitrogen content /(mg/g)	180	122.93—222.92	175.34	0.749**
有效磷 Available phosphorus content /(mg/kg)	180	3.35—6.76	4.63	0.056
速效钾 Available potassium content /(mg/kg)	180	90.81—110.11	99.01	0.427**
土壤呼吸 Soil respiration /(mg g^{-1} h^{-1})	180	0.04—0.30	0.13	0.105
容重 Bulk density /(g/cm^3)	180	1.15—1.28	1.18	-0.504**
总孔隙度 Total porosity /%	180	52.56—56.81	55.76	0.355**
毛管孔隙度 Capillary porosity /%	180	35.09—39.09	37.56	0.098
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity /%	180	16.40—18.92	18.10	0.215
自然含水量 Natural moisture capacity /%	180	23.90—28.57	26.06	0.335**
毛管持水量 Capillary moisture capacity/%	180	35.09—45.06	39.03	0.497**
田间持水量 Field moisture capacity /%	180	28.12—34.42	31.09	0.544**
上层渗透性 Upper strata saturated permeability /(mm/min)	180	8.35—12.34	11.25	0.376**
下层渗透性 Lower strata saturated permeability /(mm/min)	180	3.74—10.33	7.03	0.292*

2.2　喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳的时间分布格局

2.2.1　喀斯特石漠化演替过程中土壤有机碳变化的时间进程

为了考察石漠化生态系统演替过程中土壤有机碳变化的时间进程,运用了空间替代时间的方法,研究了石漠化 5 个典型演替阶段(无、潜在、轻度、中度和强度石漠化)的土壤有机碳含量分布(表 9)。研究结果显示,无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化环境土壤有机碳含量平均值分别为 30.59、20.44、27.54、26.96、26.36 mg/kg。多重比较结果显示,不同石漠化等级土壤有机碳含量有显著差异,无石漠化环境土壤有机碳含量(20.36—38.89 g/kg)显著大于潜在石漠化(16.35—36.87 g/kg),而潜在石漠化环境土壤有机碳与轻度石漠化(17.67—36.72 g/kg)、中度石漠化(17.34—32.89 g/kg)、强度石漠化(14.65—33.78 g/kg)无显著差异,无石漠化环境土壤有机碳含量与轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化也无显著差异。由结果可见,随着石漠化干扰程度的递增,土壤有机碳含量并非一直减小或增加,而是显示了一个先减小后增加的趋势。

表 9　不同石漠化等级土壤有机碳含量

Table 9　Comparisons of SOC content among the five degrees of karst rocky desertification

石漠化等级 Degree of rocky desertification	样品数 No.	土壤有机碳含量 SOC content/(mg/kg) 含量变异范围 Range	均值 Mean	$SSR_{0.05}$
无 Nil	36	20.36—38.89	30.59	a
潜在 Potential	36	16.35—36.87	20.44	b
轻度 Slight	36	17.67—36.72	27.54	ab
中度 Moderate	36	17.34—32.89	26.96	ab
强度 Severe	36	14.65—33.78	26.36	ab

2.2.2 喀斯特石漠化生态系统中土壤有机碳的季节变化

土壤有机碳的储量是进入土壤的植物残体量及其在土壤微生物作用下分解损失量二者之间平衡的结果[25-27]。温度、降水、二氧化碳的浓度会影响输入土壤中的有机碳含量与土壤中碳的分解速率,这些气候因子对土壤有机碳蓄积有重要作用[27]。一年中不同季节,这些气候因子都会发生明显变化,可能导致土壤有机碳的明显改变。为了探明喀斯特石漠化生态系统中土壤有机碳含量的年变化,本研究对所选择的 3 个研究区共 90 个土壤采样点分别于 2014 年 4 月和 8 月进行了采样测定土壤有机碳,并对两个不同季节获得的土壤有机碳进行统计分析比较,具体结果见表 10。结果显示,石漠化生态系统春季土壤有机碳含量变异范围为 18.35—32.34 g/kg,含量平均值为 26.81 g/kg;夏季土壤有机碳含量均值为 24.99 g/kg,变异范围为 17.25—30.18 g/kg,但两者之间无显著差异。

表 10 不同季节土壤有机碳含量变化

Table 10 Comparisons of SOC content between seasons of winter and summer

季节 Season	样品数 No.	土壤有机碳含量 SOC content /(g/kg)		$SSR_{0.05}$
		含量变异范围 Range	均值 Mean	
春季(4 月)Spring (April)	90	18.35—32.34	26.81	a
夏季(8 月)Summer (August)	90	17.25—30.18	24.99	a

3 讨论和结论

3.1 喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳分布特征与驱动机制

土壤有机碳的含量及其动态平衡也是反映土壤质量或土壤健康的一个重要指标,直接影响土壤肥力和作物产量的高低[1, 28]。研究表明,土壤有机碳在很大程度上影响着土壤结构的形成和稳定性、土壤的持水性能和植物营养的生物有效性以及土壤的缓冲性能和土壤生物多样性等,缓解和调节与土壤退化及土壤生产力有关的一系列土壤过程[29]。本研究结果显示,所选取的 3 个典型研究土壤有机碳平均值为 23.42—26.03 g/kg,与前人在中国南方喀斯特其他石漠化地区研究结果一致[15, 17],明显小于其他生态系统土壤有机碳的含量,显示了喀斯特石漠化生态系统土壤贫瘠,也印证了喀斯特生态系统的脆弱性。

喀斯特脆弱生态系统的退化是以强烈的人类干扰为驱动力、以植被减少为诱因、以土地生产力退化为本质、以出现类似荒漠化景观为标志的复合过程[5]。长期以来,人们一直认为随着石漠化程度增加,土壤退化程度亦是随之增加,强度石漠化环境的土壤退化最严重[17,28]。然而,事实却并非如此,研究结果显示,喀斯特石漠化环境土壤有机碳含量的演变并不是随着石漠化等级的增加而一直退化,而是一个先退化后改善的过程。这一研究结果对石漠化退化生态系统恢复重建以及应对全球气候变化具有重要意义。

盛茂银等[25]基于对中国南方喀斯特石漠化土壤理化性质研究结果提出石漠化环境裸露岩石聚集效应学说。这种聚集效应指的是裸露的岩石将大气沉降的养分及其岩溶产物汇聚到周围的土壤中。随着石漠化程度增加,裸岩聚集效应逐渐增强。在强度石漠化环境中,这种聚集效应非常明显,加之水土流失作用减弱,致使退化的土壤养分和物理性能得到改善。这一学说可能也是石漠化生态系统土壤有机碳含量演变的内在驱动机制。此外,对不同季节的土壤有机碳含量比较研究结果显示,石漠化环境春季土壤有机碳含量与夏季土壤有机碳含量无显著差异。

3.2 喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳分布的影响因素

土壤有机碳是陆地碳库的重要组成部分,是退化生态系统恢复重建研究的重要内容,也是当前全球碳循环和全球变化研究的热点[29]。目前在全球变化的背景下,对土壤有机碳储量、分布、转化、衰减机理进行研究,并揭示其影响因素和生态效应,将有助于探求如何科学地利用和保护有限的土壤资源,减缓土壤中温室气体排放、增加土壤碳截存,提高土壤质量,对退化土地的生态恢复及环境治理和保存都具有重要的意义[27, 29]。

土壤中的有机碳是进入土壤的植物残体量以及在土壤微生物作用下分解损失的平衡结果,其储量的大小受气候、植被、土壤属性以及农业经营实践等多种物理因素、生物因素和人为因素的控制,并存在各种因子之间的相互作用[3, 17]。近年来,对于影响土壤有机碳储量的自然因素和人为因素,以及土壤有机碳向大气的排放,土地利用/覆盖变化对土壤有机碳转化的影响等,已成为人们非常关心和研究的热点[3, 17]。

本研究考察了土壤理化性质、土地覆被变化和地貌对土壤有机碳含量的影响。研究结果显示,土壤有机碳与土壤其它绝大多数理化因子具有明显的相关性,与土壤总氮、水解氮、速效钾、总孔隙度、自然含水量、毛管持水量、田间持水量和上层渗透性存在极显著地正相关,与总磷、下层渗透性存在显著地正相关,与容重存在极显著地负相关,而与 pH、总钾、有效磷、土壤呼吸、毛管孔隙度、非毛管孔隙度无明显相关性,研究结果与前人研究结果一致[17, 22,25],显示了土壤性质是影响土壤有机碳含量及稳定性的重要因素。

土壤环境如地形地貌特征也是影响土壤有机碳含量及稳定性的重要因素[3]。本研究考察了中国南方喀斯特 3 个典型地貌的土壤有机碳,结果显示不同地貌土壤有机碳无显著差异。这一结果可能是研究区选择、研究尺度上的差异以及样地的选择导致研究结果和前人不一致[3,28]。由人类活动引起的土地利用/覆盖变化是土壤碳库和碳循环最直接的影响因子[29],本研究也考察了喀斯特石漠化生态系统典型土地覆被变化对土壤有机碳的影响,结果显示不同土地覆被对土壤有机碳含量有显著地影响。研究结果不仅对石漠化退化生态系统恢复重建具有重要意义,同时对应对全球变化、碳循环减源增汇也具有重要参加价值。

参考文献(References):

[1] 陈庆强, 沈承德, 易惟熙, 彭少麟, 李志安. 土壤碳循环研究进展. 地球科学进展, 1998, 13(6): 555-563.

[2] 彭少麟, 陆宏芳. 恢复生态学焦点问题. 生态学报, 2003, 23(7): 1249-1257.

[3] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 苏冬雪, 王莹, 邱岭. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性. 生态学报, 2011, 31(18): 5207-5216.

[4] 沈宏, 曹志洪, 王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究. 自然资源学报, 1999, 14(3): 206-211.

[5] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 115-121.

[6] Xu E Q, Zhang H Q, Li M X. Mining spatial information to investigate the evolution of karst rocky desertification and its human driving forces in Changshun, China. Science of the Total Environment, 2013, 458-460: 419-426.

[7] 杨胜天, 朱启疆. 论喀斯特环境中土壤退化的研究. 中国岩溶, 1999, 18(2): 169-175.

[8] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式. 水土保持学报, 2002, 16(2): 29-32, 79-79.

[9] Sweeting M M. Karst in China: Its Geomorphology and Environment. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 112-118.

[10] 罗光杰, 李阳兵, 王世杰, 程安云, 丹文丽. 岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比——以贵州四个典型地区为例. 生态学报, 2011, 31(14): 3882-3889.

[11] Li Y B, Shao J A, Yang H, Bai X Y. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. Environmental Geology, 2009, 57(3): 621-627.

[12] Paul E A, Harris D, Collins H P, Schulthess U, Robertson G P. Evolution of CO_2 and soil carbon dynamics in biologically managed, row-crop agroecosystems. Applied Soil Ecology, 1999, 11(1): 53-65.

[13] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应. 地球学报, 2001, 22(2): 159-164.

[14] 严宁珍, 程永毅, 杨剑虹, 屈明. 岩溶山地土壤有机碳的分布特征及表层土壤有机碳的影响因素分析——以重庆市北碚区为例. 中国岩溶, 2013, 32(3): 292-298.

[15] 刘方, 王世杰, 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 龙健. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. 生态学报, 2005, 25(3): 639-644.

[16] Zhang X B, Bai X Y, He X B. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China. Carbonates and Evaporites, 2011, 26(2): 149-153.

[17] 宋希娟, 王克林, 刘淑娟, 曾朝霞, 寻瑞. 桂西北喀斯特地区不同土地利用方式土壤的有机碳含量及养分特征. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 39(6): 655-659.

[18] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 安裕伦, 吕涛, 蓝安军. 喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究——以贵州省为例. 北京: 地质出版社, 2002: 134-137.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京：中国农业出版社, 2000.
[20] 马雪华. 森林生态系统定位研究方法. 北京：中国科学技术出版社, 1994：25-135.
[21] 杜荣骞. 生物统计学(第三版). 北京：高等教育出版社, 2009：25-28, 123-145.
[22] 张勇, 史学正, 赵永存, 于东升, 王洪杰, 孙维侠. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究. 环境科学, 2008, 29(8)：2314-2319.
[23] 刘鸿雁, 黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化. 应用生态学报, 2005, 16(11)：2041-2046.
[24] 林德喜, 樊后保, 苏兵强, 刘春华, 蒋宗垲, 沈宝贵. 马尾松林下套种阔叶树土壤理化性质的研究. 土壤学报, 2004, 41(4)：655-659.
[25] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应. 生态学报, 2013, 33(19)：6303-6313.
[26] 盛婧, 赵德华, 陈留根. 农业生产措施对土壤碳库的影响. 生态环境, 2006, 15(2)：386-390.
[27] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 李洪杰, 仲惟磊, 李增嘉. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响. 应用生态学报, 2010, 21(2)：373-378.
[28] 魏兴琥, 徐喜珍, 雷俐, 周红艳, 李忠云. 石漠化对峰丛洼地土壤有机碳储量的影响——以广东英德市岩背镇为例. 中国岩溶, 2013, 32(4)：371-376.
[29] 吴建国, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳的影响——理论、方法和实践. 北京：中国林业出版社, 2004.